

Тема 2: Сигнали

Записки

Кристиян Стоименов

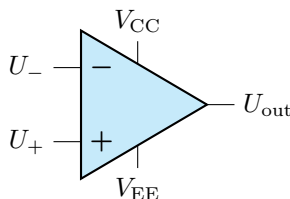
1 ноември 2023 г.

1 Операционни усилватели

Да започнем от основното - какво е операционен усилвател?

Определение 1. Операционен усилвател (ОУ) е аналогова интегрална схема, най-често с два входа и един изход, чиито основни параметри се доближават до тези на идеален усилвател, т.е. безкрайно голямо усиление, безкрайно голямо входно съпротивление и нулево изходно.

Интересен исторически факт е, че наименованието произлиза от това, че в периода на употреба на аналогови изчисления, именно ОУ е градивната част, използвайки се за всякакви математически операции - събиране, изваждане, диференциране и интегриране (и др.?). Основният символ, с който се изобразява е показан на фиг. 1. На него, както ни е казано в Определение 1 се виждат двата входа, намиращи се вляво - U_- и U_+ , наричани съответно инвертиращ и неинвертиращ, изходът - U_{out} , както и захранването на усилвателя - от V_{CC} и V_{EE} . Напрежението между двата входа обикновено се нарича *входно диференциално напрежение* - $U_{id} := U_+ - U_-$. Често захранването на ОУ се подразбира от контекста и източниците не се уточняват в схемата.



Фигура 1: Символ за операционен усилвател.

FAQ. Защо захранването на ОУ е двуполарно? Тъй като усиляването се извършва върху сигнал с произволна полярност.

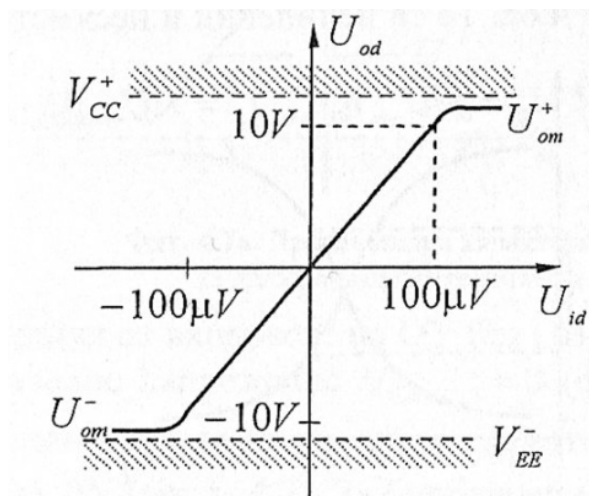
Ще си припомним конкретно употребата на ОУ като преобразувател напрежение-напрежение. Основният параметър, който ни интересува е т.нар. *диференциалният коефициент на усиление по напрежение* A_d , който стандартно е от порядъка на хиляди до стотици хиляди, т.е. $80 \div 100dB$ (при анализ на схеми считаме $A_d \rightarrow \infty$).

FAQ. Мерната единица dB не е действителна величина, а единствено изразява съотношението между входната и изходната стойност. Съществуват отделни "дефиниции", като в случая ни интересува тази за напрежение (за ток е същата):

$$dB = 20 \cdot \log \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

Отбелязваме, че \log е десетичен. Напрежението в знаменател може да се нарече е референтно - U_{ref} .

Функцията на усиление по напрежение е илюстрирана на фиг. 2. Хоризонталните участъци могат да се нарекат участъци на *насищане*, където се установяват $U_{om}^+ \approx V_{CC}^+$ и $U_{om}^- \approx V_{EE}^-$.

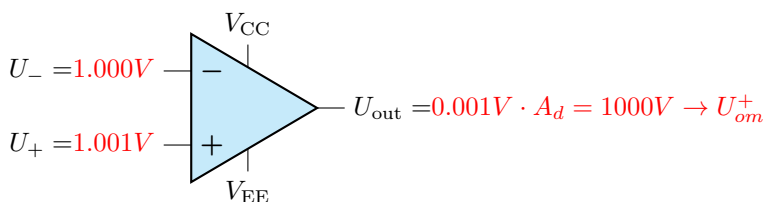


Фигура 2: Усилване по напрежение

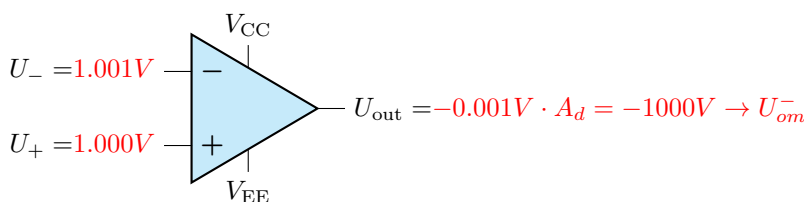
1.1 Примери

1.1.1 Сравнител

Да разгледаме какво се случва, ако използваме ОУ с два входни сигнала, които имат минимална разлика в стойностите си. Фиг. 3 и 4 показва двата възможни случая.



Фигура 3: Пример при $A_d = 10^6$ и $U_{id} > 0$



Фигура 4: Пример при $A_d = 10^6$ и $U_{id} < 0$

Можем да заключим, че действието на ОУ в този случай (без обратна връзка) е подобно на действието на сравнител (или компаратор).

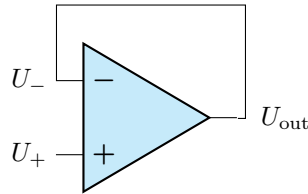
FAQ. Какво ще се случи ако заземим и двата входа? Тогава бихме получили $U_{id} = 0$ (в идеален случай без никакви смущения) и следователно $U_{out} = A_d \cdot U_{id} = 0$.

1.1.2 Буфер

Поради високата стойност на усилване, използвани самостоятелно ОУ нямат практически употреби и се добавя т.нар *обратна връзка* - т.е свързваме изходния сигнал към един от входните. Тук е момента, в който да уточним "златните правила" на ОУ. Те са два практически съвета, които улесняват анализирането на схеми с ОУ:

1. При наличие на обратна връзка изходът "прави каквото може за да направи потенциалната разлика между двата входа нула.
2. През входовете на усилвателя не протича ток.

Запознати с основните факти, нека разгледаме най-простия вариант на схема с обратна връзка на фиг. 5.



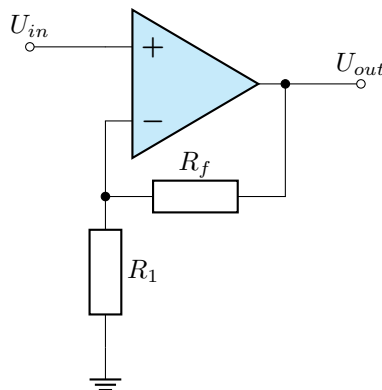
Фигура 5: Пример с възможно най-проста обратна връзка.

Нека разгледаме какъв е резултатът от това свързване. Да кажем, че върху U_+ има някакво напрежение - например $1V$, следвайки Златно правило на ОУ №1, при U_- също има $1V$. Обаче U_- и U_{out} са свързани накъсно, т.е. имат един и същи потенциал от $1V$. По този начин схемата служи единствено като буфер. От известно значение е, че съпротивлението на изхода и минимално (липсва в идеалния случай) и ОУ има способност да подава от порядъка на $10 \div 100mA$, докато входният импеданс е максимален (∞ в идеалния случай) и не въвежда шумове.

FAQ. Високо импедансно състояние е практически еквивалентно на отворена верига.

1.2 Усилвателни схеми

1.2.1 Неинвертиращ усилвател с ОУ



Фигура 6: Неинвертиращ усилвател, реализиран чрез ОУ.

Основната идея на схемата за неинвертиращ усилвател е да намалим усиляването, което извършва ОУ. Както вече споменахме, стойностите за A_d са много големи, което не ни върши работа в общия случай. Поради тази причина, искаме "да овладеем" усиляването и това извършваме по най-простия вариант - използваме делител на напрежение. Обичайно имаме, че $R_1 \ll R_f$, което означава, че на входа ще получаваме само малка част от "предишния" изход, което води до намаляване на усиляването. Следният резултат показва как тази ООВ се отразява на стойността на A_d :

Факт.

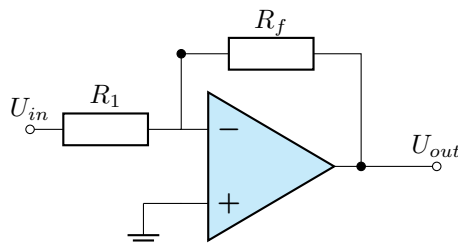
$$A_d = \frac{R_f}{R_1} + 1$$

FAQ. Причината да се нарича неинвертиращ е, че използваме неинвертиращия вход на ОУ, което означава, че сигналят на изхода ще бъде със същия поляритет.

Бележка. Схемата за ОУ, с която реализирахме буфер е частен случай на неинвертиращ усилвател? Колко е стойността на A_d там?

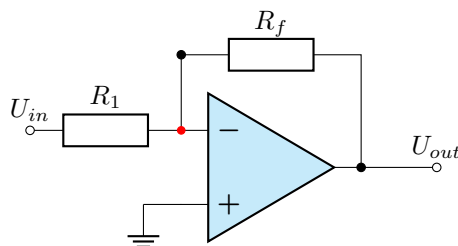
Отг. Стойностите за R_f и R_1 съответно са 0 и ∞ , което влече $A_d = \frac{0}{\infty} + 1 = 1$.

1.2.2 Инвертиращ усилвател с ОУ



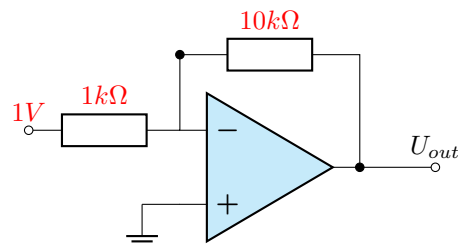
Фигура 7: Инвертиращ усилвател, реализиран чрез ОУ.

За да анализираме схемата на инвертиращ усилвател, изложена на фиг. 7, отново ще приложим двете основни правила за ОУ. Ще започнем, отбелязвайки, че в схемата е използвана обратна връзка, което означава, че потенциалите на двата входа трябва да са равни. На фиг. 8 е показана точката, която обичайно се нарича *условна земя*, тъй като тя приема потенциала на неинвертиращия вход.



Фигура 8: Условна земя в схемата на инвертиращ усилвател, реализиран чрез ОУ.

На пръв поглед изглежда като доста странна схема - как така и двата входа са $0V$, пък очакваме схемата да усилва? Припомняме, че ОУ "върхи каквото трябва (и може)" на изхода, за да изравни потенциалите на двата входа, но тъй като няма как да промени състоянието на неинвертиращия вход - той е директно заземен, то единствената възможност е чрез обратната връзка да промени инвертиращия. Нека поставим примерни стойности, за да улесним разглеждането - фиг. 9.

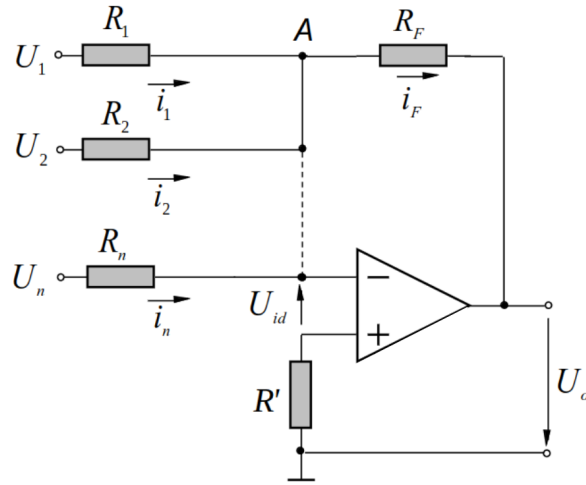


Фигура 9: Инвертиращ усилвател, реализиран чрез ОУ, с поставени примерни стойности.

Прилагайки закона на Ом, пресмятаме, че токът, който протича през резистора на входа е

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{10^{-3}} = 1mA$$

. Обаче знаем също, че през входовете на ОУ такъв няма и следователно трябва да отиде към обратната връзка, опитвайки се да достигне земя през захранването на ОУ. Следователно можем



Фигура 10: Схема на инвертиращ суматор с ОУ.

да пресметнем пада на напрежение върху обратната връзка -

$$U_f = I \cdot R_f = 1mA \cdot 10k\Omega = 10V,$$

като трябва да отбележим, че положителната страна е "вляво а отрицателната - "вдясно". Това е важно, защото комбинатор със знанието, че положителната страна всъщност има потенциал $0V$, влече, че напрежението на изхода е $U_{out} = -10V$. Така при подаден $1V$ получихме $-10V$ на изхода, т.е усилването ни е $A_F = -10$. Обобщавайки, имаме следната система:

$$\begin{cases} I_G = \frac{U_G}{R_1} \\ R_F \cdot I + U_{out} = 0 \end{cases} \implies U_{out} = -\frac{R_F}{R_1} U_G \implies A_F = \frac{U_{out}}{U_G} = -\frac{R_F}{R_1}$$

FAQ. Ако трябва да сравним двете схеми на усилвател, е добре да посочим, че недостатък на инвертиращия е фактът, че протича ток на входния сигнал, което означава, че може би не е подходя в комбинация с високо импедансен източник на входния сигнал.

1.3 Суматор на напрежения

Следващата схема, с която следва да се запознаем накратко е тази на суматор, реализирана чрез ОУ. Както казахме в началото, основната роля на ОУ в периода на тяхното първоначално разработване е именно това да извършват математички операции. Сега ще видим каква е имплементацията на операцията *събиране*.

На фиг. 10 е показана схема на инвертиращ суматор с ОУ. Казваме, че инвертиращ по същата причина, по която разделихме усилвателите схеми на инвертираща и неинвертиращата - неинвертиращият вход е заземен, а обратната връзка на ОУ е свързана към входния сигнал, пристигащ на инвертиращия вход. Разбира се това означава и че входният и изходният сигнал се различават по поляритет.

Основната идея на схемата силно се доближава до тази на неинвертиращата усилваща схема: Примеаеме, че анализираме идеален ОУ, за който $A_d \rightarrow \infty$ и $U_{id} \rightarrow 0$. На входовете U_1, \dots, U_n протича ток - съответно I_1, \dots, I_n . Знаем, че входа на ОУ е високо импедансен, което означава, че какъвто и да е ток да има от входните линии, той ще протече през обратната връзка, т.е

$$I_1 + \dots + I_n = I_F$$

и по закона на Ом, това е еквивалентно на

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_F$$

От вече разгледана инвертираща усилваща схема знаем, че

$$U_{out} + R_F \cdot I_F = 0,$$

което влече

$$U_{out} = -R_F \cdot I_F = -R_F \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

или

$$U_{out} = \sum_{i=1}^n -\frac{R_F}{R_i} \cdot U_i$$

Когато съпротивленията на всички входове са равни имаме точно

$$U_{out} = -(U_1 + \dots + U_n)$$

2 АЦП

2.1 Балъшко АЦП

2.2 АЦП чрез R-2R стълба

3 ЦАП

3.1 Flash

3.2 SAR

4 Литература